

論文の内容の要旨

論文題目	Study of the characteristics of pulsating aurora using multi-point high-speed optical observations (多地点高速光学観測を用いた脈動オーロラの性質に関する研究)
学位申請者	川村 勇貴

脈動オーロラ (Pulsating Aurora: PsA) は、数秒から数十秒の変化 (主脈動) の上に秒以下の細かい変動 (内部変調) が重畳した階層的周期構造を有するディフューズオーロラ的一种である。本論文では、複数地点に設置された高速光学観測機器を用いて、PsA の階層的周期構造の制御機構について議論している。

第 1 章では、本論文の研究背景、関連する基礎事項とともに、これまで行われてきた PsA の観測を紹介する。第 2 章では、本論文で用いる地上光学観測機器の詳細を示す。第 3 章では、ノルウェー・トロムソに設置されている 5 波長フォトメータを用いて、波長 557.7 nm のオーロラ発光に寄与する $O(^1S)$ の Lifetime を統計的に解析し、PsA の発光高度を推定している。解析には 2018 年 1 月から 3 月のうち 37 晩において観測された PsA を用いた。波長 427.8 nm と波長 557.7 nm のオーロラ発光の時系列に対して相互相関解析を行うことで、波長 557.7 nm における $O(^1S)$ の Lifetime を算出し、その分布を導出した。その結果、Lifetime の平均値は 0.67 秒、最頻値は 0.70 秒であった。また、5 波長フォトメータと EISCAT UHF レーダーにより PsA が同時に観測された事例を用いて、発光高度と電離高度の直接比較を行った。その結果、両者は全体として良い一致を示しており、本論文における手法が PsA 電子のエネルギーの推定手法として有用であることが示された。さらに、得られた Lifetime の分布から、発光高度の MLT 分布を導出した。その結果、朝側に行くほど、発光高度は低くなっており、これは朝側で PsA 電子のエネルギーが高くなる傾向にあることを示している。特に 06 MLT 付近では発光高度の顕著な低下が見られた。しかしながら、背景パラメータを用いたモデル計算により、コーラス波動との共鳴エネルギーを計算したところ、観測結果を支持するような共鳴エネルギーの MLT 変化を得ることはできなかった。このことから、PsA の発光高度の変化は共鳴エネルギーの MLT 変化のみではなく、コーラス波動の伝搬特性も加味した上での議論が必要になることが示された。

第 4 章では、北欧 4 地点に設置された EMCCD 全天イメージャを用いて、PsA の階層的周期構造(主脈動及び内部変調)の制御機構について議論している。この研究においては、上述の 4 地点において同時に活発な PsA が観測された 2018 年 3 月 15 日 00:30-01:30 UT のイベントを解析に用いた。周波数解析の結果、主脈動の大部分は 4-8 秒であり、内部変調の周波数は 3 Hz に集中していた。また、どの程度の PsA が内部変調、つまりは階層的周期構造を有しているかの割合を算出したところ、全体の 43%が内部変調を有していた。さらに、その割合は高緯度側ほど低くなる傾向にあることも分かった。上記の結果を踏まえて、PsA の階層的周期構造の制御機構を議論するために、PsA 電子の磁気圏-電離圏間の移動時間を考慮に入れた上での PsA の時間変化の再現を行った。再現結果から、PsA 電子のエネルギーの多様性に起因する移動時間の分散が内部変調の速い変化を潰していることが示された。また、内部変調を有する PsA の発生頻度が高緯度で低いことについては、磁力線の長さが起因しており、磁力線が長くなることで PsA 電子の移動時間の分散が大きくなり、結果として、内部変調を潰れる効果がより大きく出たと考えられる。

第 3 章及び第 4 章で示した結果から、PsA の階層的周期構造は磁気圏でのコーラス波動の強度変調を直接反映したものではなく、PsA 電子の磁気圏-電離圏間の移動時間の分散が加わって形成されていることが明らかとなった。この移動時間の分散は、PsA 電子のエネルギーに依存しており、仮にエネルギーの高い電子のみが PsA に寄与している場合には、分散の効果は小さくなり、内部変調が明確になることが予想される。このように、PsA 電子のエネルギーの多様性が、階層的周期構造を形成する上で、重要な役割を果たしていることが本論文により明らかとなった。さらに、この結果は内部変調の明確さが PsA 電子のエネルギーの指標として有用であることを示している。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 川村 勇貴

審査委員主査 細川敬祐

委員 來住直人

委員 芳原容英

委員 小島年春

委員 津田卓雄

(*自筆署名の場合に限り、押印省略可)

地球の高緯度地方に出現するオーロラは、地球近傍の宇宙空間（磁気圏）から磁力線に沿って降下する電子が大気原子や分子に衝突することで発光する現象である。このオーロラの中に、発光強度が数秒から数十秒の周期で変動する「脈動オーロラ」というものがある。脈動オーロラの明滅は、磁気圏からの電子降下が準周期的に変動することによって生じると考えられているが、脈動オーロラを引き起こす電子のエネルギーがどのような分布をし、その特性が脈動オーロラの時間変動をどのように制御しているのかについては、これまでに十分な研究が行われてこなかった。脈動オーロラの輝度の時間変化は、多くの場合、数秒から数十秒周期の明滅である「主脈動」のうえに、「内部変調」と呼ばれる 3 Hz 程度の短周期の変動が重畳することによって形作られていることが知られている。しかし、この内部変調と呼ばれる秒以下の変動の特性については、観測機器の時間分解能の限界から十分な研究が行われてきておらず、降下電子エネルギーとの関連性も明らかにされていない。本論文では、申請者が観測プログラムを開発し、北欧への機器設置に参画した全天カメラおよびフォトメータと呼ばれる高速光学撮像装置によって得られたデータを統計的に解析した結果を報告している。

本論文は以下の 5 章から構成されており、3, 4 章が申請者の行った研究である。5 章で全体の結論が述べられている。

1 章では、本研究の背景となる地球周辺の宇宙環境に関する基礎事項が記載されている。また、脈動オーロラ研究の課題、未解明問題に関する考察が行われ、それを踏まえて本研究で取り組むべき内容が提示されている。

2 章では、申請者もその開発および設置に従事した地上光学観測機器の詳細が述べられている。

3 章では、フォトメータによって複数の波長において得られたオーロラ輝度の時系列データの比較から、脈動オーロラを作り出す降下電子のエネルギーを導出する手法を提案している。この手法では、まず、557.7 nm の波長におけるオーロラの発光が、粒子降下に伴う酸素原子の励起から 1 秒弱遅れて生じることに着目し、即時的に発光する 427.8 nm の波長における発光強度との時間差を自動的に求めることによって、557.7 nm 発光のライフタイムを導出する。このライフタイムは中性大気の密度が高いほど短くなるため、オーロラの発光高度の推定に用いることができ、最終的には降下電子（オーロラ電子）のエネルギーの定性的な把握に用いることが可能になる。この手法を大量のフォトメータ観測データに適用することによって、脈動オーロラの発生に関与する電子のエネルギーが多様であり、特性エネルギーが朝側のローカルタイムにおいて顕著に増大することを明らかにした。これまでの研究では、レーダーによる電子密度の観測などから脈動オーロラ電子のエネルギーを推定する研究が行われてきたが、本研究は、大量の光学データを用いてエネルギーを推定する手法を確立し、多くのデータに基づいて脈動オーロラ電子のエネルギー特性を議論することを可能にしたという点において評価できる。

4 章においては、全天高速撮像カメラのデータを用いて脈動オーロラの内部変調の出現特性を解析した結果を報告している。申請者は、北欧の 4 地点において同時に観測された脈動オーロラの事例に対して周波数解析を行うことで、数秒から数十秒の周期性をもつ主脈動と、秒以下のタイムスケールで変動する内部変調をそれぞれ抽出し、脈動オーロラを、内部変調を伴うものと伴わないものに分けて、それぞれの出現特性を導出した。その結果、内部変調は全ての脈動オーロラにおいて観測される訳ではなく、高緯度側においてその発生頻度が低くなることが明らかになった。この性質を理解するために、磁気圏におけるコーラス波動による電子の散乱過程、粒子の降下過程を考慮したシミュレーションを実施し、高緯度ほど磁力線が長いためにエネルギーの分散による波形のスミアリングが起こっている可能性を指摘した。このシミュレーションによって、散乱される電子が幅広いエネルギーを持っている場合、電離圏までの到達時間に分散が生じるために、コーラスの秒以下の時間変化が地上まで伝達されないことを意味する。この結果は、脈動オーロラの明滅が、磁気圏電磁波動の時間変化のみを反映するのではなく、降下電子のエネルギーや磁力線のジオメトリなどの多くのパラメータによって決定されていることを示している。

5 章では、本論文全体の結論が記載されている。

本研究によって、脈動オーロラを光らせる降下電子のエネルギーが多様で、そのエネルギー特性によって明滅に見られる階層的周期構造の出現特性が大きく影響を受けることが示された。この結果は、脈動オーロラの時間変動を理解するための基盤的な情報を与えるものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。